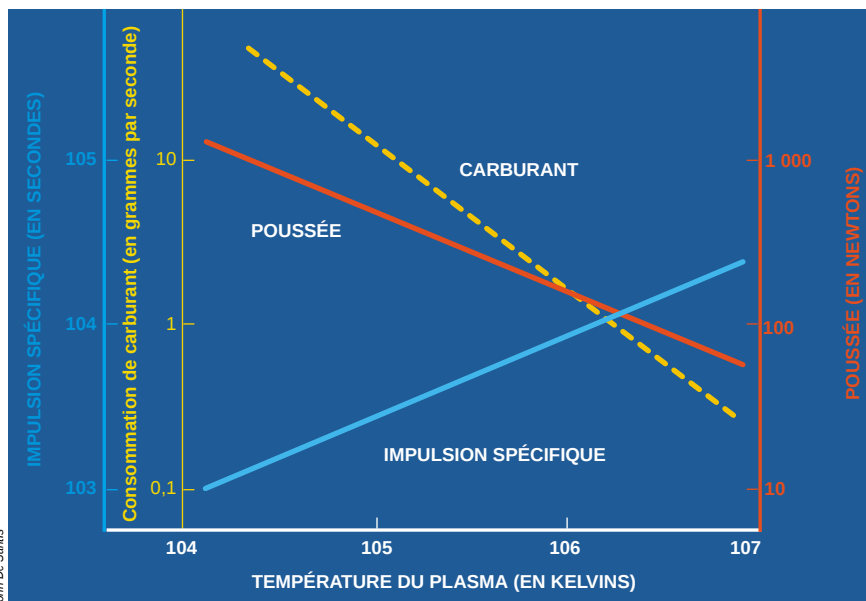




6. VASIMR contient l'équivalent d'une boîte de vitesse. Ce moteur est conçu de façon à ce que la température du plasma éjecté soit ajustable, ce qui accroît la vitesse d'éjection (donc l'impulsion spécifique, en bleu) et réduit la consommation de carburant (en jaune). Dans ce cas, la poussée produite diminue (en rouge). La puissance du moteur VASIMR, constante, est égale à dix mégawatts.

L'énergie vitale

Dans l'espace, l'énergie est vitale. Une vérité que l'aventure vécue par l'équipage d'Apollo XIII au printemps 1970 illustre. Les astronautes n'ont dû leur salut qu'à l'utilisation judicieuse du peu d'énergie qui restait dans les batteries. Le sauvetage aurait été impossible si le vol avait duré plus longtemps.

La rapidité de la propulsion et la fiabilité des équipements qui assurent la survie imposent une énergie minimale. La navette spatiale, par exemple, consomme environ 15 kilowatts en orbite, tandis que la future station orbitale internationale consommera 75 kilowatts. Une mission vers Mars nécessiterait entre 20 et 60 kilowatts, sans compter l'énergie de propulsion. Avec une puissance supérieure, le voyage serait plus rapide : une fusée équipée d'un moteur VASIMR de 200 mégawatts atteindrait Mars en 39 jours.

Lors des expéditions dans l'espace proche de la Terre, l'énergie provient en général de combustibles chimiques et de panneaux solaires. La station orbitale tirera, par exemple, son énergie de 2 500 mètres carrés de panneaux. Toutefois, aussi bien les carburants chimiques que les panneaux solaires sont insuffisants, dès que l'on s'éloigne du Soleil. Ainsi, un «panneau» solaire de dix mégawatts, par exemple, mesurerait environ 68 000 mètres carrés sur Mars et 760 000 mètres carrés sur Jupiter ! Des tailles qui les rendent invivables.

Les seules sources d'énergie compactes et suffisamment puissantes sont nucléaires. L'électricité de bord de certains satellites a déjà été fournie par des générateurs thermo-électriques alimentés par la chaleur naturellement libérée lors de la désintégration du plutonium. Pour un vol habité, un tel système ne serait pas assez efficace. En revanche, un réacteur nucléaire embarqué, tirant son énergie de la fission de l'uranium, produirait dix millions de fois plus d'énergie que les «générateurs radio isotopiques à plutonium 238» du passé. Notons que les ingénieurs comparent les performances des sources d'énergie embarquées à l'aide du paramètre alpha, défini par le rapport de la masse de la «centrale» d'énergie en kilogrammes sur sa puissance exprimée en kilowatts. Plus alpha est petit, plus son rendement et sa puissance sont élevés. Aujourd'hui, les paramètres alpha des panneaux solaires embarqués sont compris entre 10 et 100. Ceux des piles à plutonium sont de 200. Celui d'un réacteur à uranium ne dépasse pas 0,5.

Enfin, les réacteurs nucléaires sont plus sûrs que les «générateurs radio isotopiques à plutonium, car le réacteur et son combustible peuvent être lancés séparément et assemblés sur une orbite éloignée de la Terre. Même ceux qui voudraient interdire l'utilisation de l'énergie nucléaire en orbite terrestre reconnaissent qu'elle pourrait servir lors des missions lointaines.

par résonance cyclotron confère à la fusée son impulsion spécifique élevée.

Après la création du plasma et son chauffage, le moteur doit encore fournir une poussée. Comment l'augmentation de la composante normale de la vitesse des ions peut conférer aux gaz d'échappement la puissance nécessaire ? L'efficacité du système provient en fait de la forme des lignes de champs dans la tuyère magnétique. Leur divergence transfère de l'énergie de rotation en énergie cinétique longitudinale. Les ions massifs entraînent avec eux les électrons, de sorte que c'est un fluide neutre qui s'échappe de la fusée. Dans le cas de VASIMR, cette expansion du plasma dans la tuyère se produit sur environ 50 centimètres.

Une fois l'expansion achevée, le plasma se détache de la fusée. Les études menées récemment par Roald Sagdeev, de l'Université du Maryland, et Boris Breizman, de l'Université du Texas, ont mis en évidence les mécanismes sous-jacents. La «vitesse d'Alfvén», d'après le nom du physicien suédois Hannes Alfvén qui l'a décrite le premier, y joue un rôle central. Alfvén montra que les perturbations d'un plasma se propagent le long des lignes de champ à cette vitesse précise. Dans une tuyère magnétique, la vitesse d'Alfvén joue un rôle semblable à celui de la vitesse du son dans une tuyère classique.

Le plasma se détache

Comme dans le cas du son, il existe donc un régime «subalfvénique» et un régime «superalfvénique». Ce «mur d'Alfvén» (par analogie au «mur du son») est une frontière au-delà de laquelle le flux aval ne rétroagit plus sur le flux amont, de sorte que l'éjection ne crée pas de résistance à l'avancement de la fusée. La tuyère de VASIMR est conçue pour dilater le plasma au-delà de cette frontière, en un point où l'énergie du champ est faible par rapport à celle du flux de plasma. Quand le plasma se détache, il emporte avec lui une petite quantité du champ. On pense qu'un phénomène semblable se produit dans la nature lorsque des protubérances de la couronne solaire échappent au champ magnétique du Soleil. La dépense d'énergie dans la partie où le champ est distordu diminue peu les performances de la fusée. Nos études montrent que le détachement

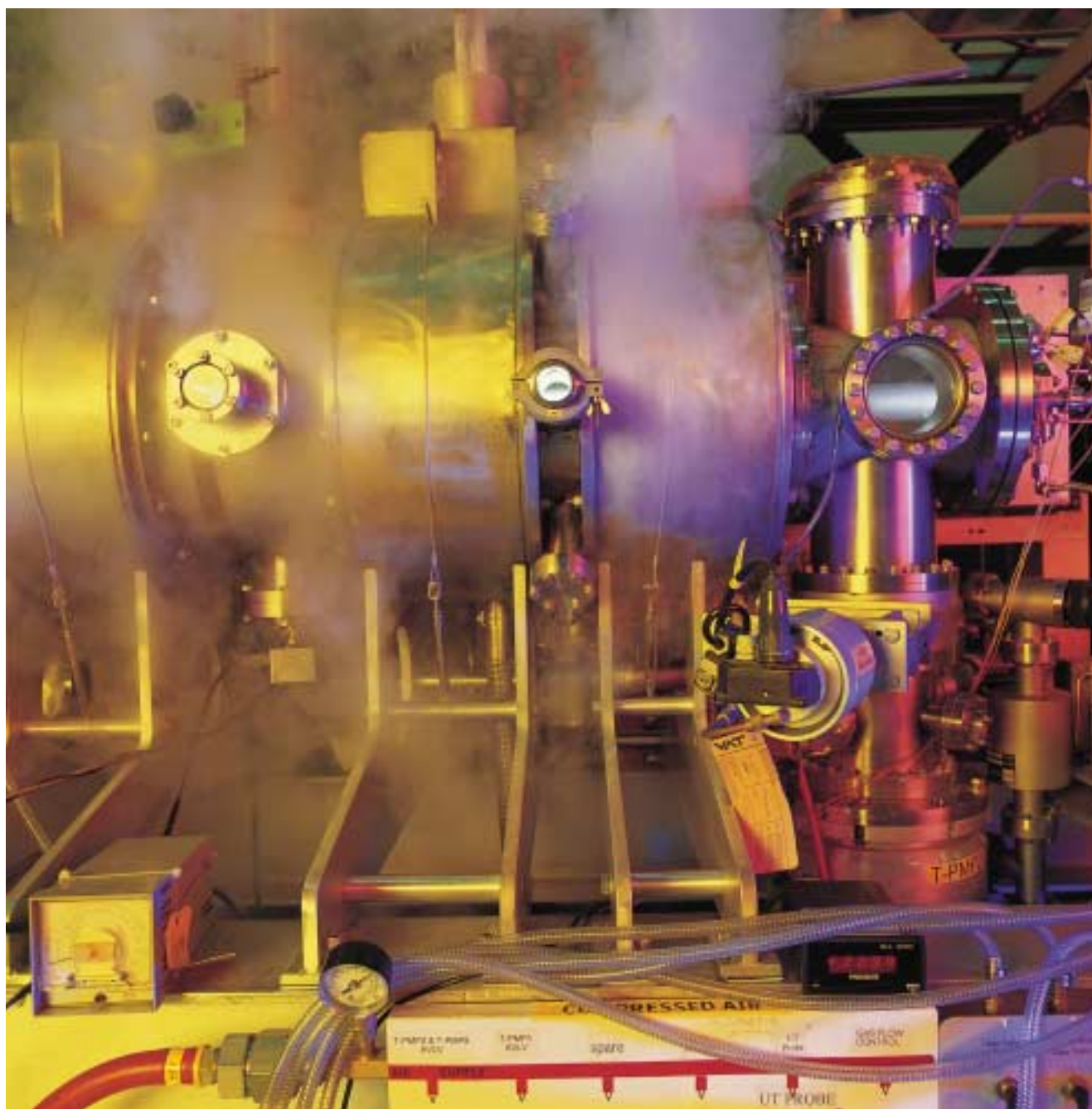
du plasma se produit un à deux mètres après le col de la tuyère.

Comment obtenir une variation de la poussée? Pour cela, nous avons prévu un moyen pour modifier l'une par rapport à l'autre les énergies délivrées au système hélicoïdal et au système de chauffage ionique par résonance cyclotron. Quand il s'agit d'obtenir une forte poussée, l'énergie est acheminée en priorité vers le système hélicoïdal, ce qui produit beaucoup d'ions à faible vitesse. Pour obtenir des impulsions spécifiques élevées (et une poussée réduite),

davantage d'énergie est envoyée vers le système de chauffage. Nous étudions également deux autres techniques de tuyère : un démarreur magnétique placé au niveau du de la tuyère qui produit une impulsion spécifique élevée (de manière à optimiser le champ en fonction de l'énergie du plasma), et un dispositif de postcombustion des atomes neutres restés dans le plasma, lequel produit une forte poussée à impulsion spécifique très basse.

Nous pouvions craindre que la régulation de poussée ne se fasse au

détriment du rendement énergétique. La création d'un plasma d'hydrogène nécessite environ 40 électronvolts par paire électron-ion (rappelons qu'un électronvolt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt). L'essentiel de cette énergie ne sert pas à la propulsion, mais seulement à la création du plasma. L'énergie cinétique qui engendre la poussée doit être rajoutée. Dans le premier prototype de VASIMR que nous avons construit, la quantité d'énergie cinétique ajoutée pour une impulsion spécifique élevée



7. DES NUAGES ONDOYANTS DE VAPEUR sortent des puissants électro-aimants refroidis à l'azote liquide.

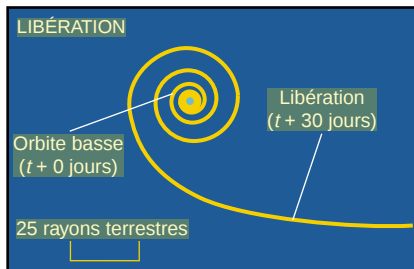
était d'environ 100 électronvolts par ion. Ainsi, une dépense totale d'énergie de 140 électronvolts donne 100 électronvolts d'énergie utile, ce qui représente un rendement électrique d'environ 70 pour cent. Les modèles de moteur VASIMR sur lesquels nous travaillons devraient atteindre des énergies de 800 à 1 000 électronvolts pour la même énergie initiale, ce qui améliorera notablement le rendement. Lorsque

l'impulsion spécifique est faible, on produit une quantité supérieure de plasma afin que la poussée soit plus forte ; l'énergie cinétique par particule se rapproche alors dangereusement de l'énergie d'ionisation, ce qui diminue l'efficacité du moteur. Toutefois, rappelons que l'on peut «choisir» le rendement selon la phase de la mission : quelques poussées fortes, mais brèves, peuvent parfois être plus efficaces. De surcroît, l'efficacité de

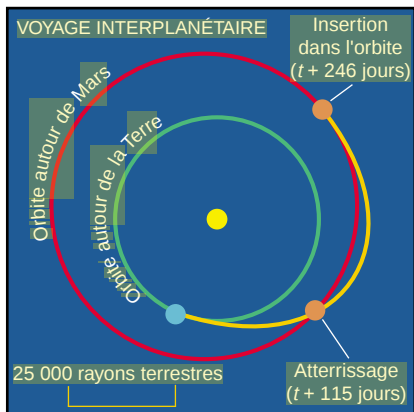
l'ionisation a une incidence sur le rendement. Une certaine proportion des atomes ne subit pas l'ionisation. Ils réduisent l'efficacité du moteur quand ils restent mélangés aux ions. Quand un atome neutre froid cède un électron à un ion chaud, l'atome neutre chaud résultant est insensible au champ magnétique et s'échappe, transférant son énergie sur les structures environnantes. L'ion froid qui subsiste est inutilisable.



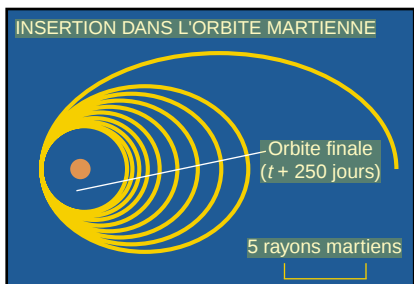
8. UN HUBLLOT DE VERRE de 15 centimètres de diamètre, placée dans l'axe du moteur VASIMR, permet de vérifier l'allumage du plasma.



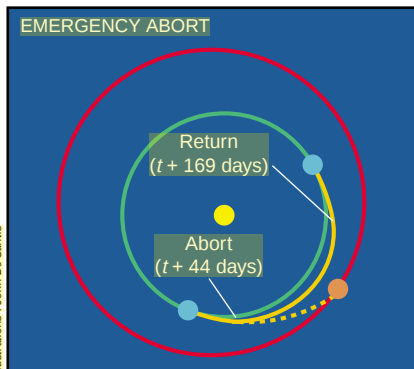
9. AU COMMENCEMENT DE SON VOYAGE vers Mars, un vaisseau doit acquérir de la vitesse pour s'arracher à l'attraction terrestre. Le moteur VASIMR a alors une poussée maximale et une impulsion spécifique de 3 000 secondes.



Contrairement aux fusées à propulsion chimique, une fusée équipée d'un moteur VASIMR peut changer de régime : elle atteint une impulsion spécifique de 30 000 secondes, 75 jours après le décollage, puis elle ralentit.



Après s'être rapproché de Mars pour larguer les astronautes, le vaisseau spatial rejoint progressivement une orbite autour de la planète rouge.



Une fusée équipée d'un moteur VASIMR aurait suffisamment d'autonomie pour revenir vers la Terre si un incident se produisait au début du voyage.

Pour réduire ce phénomène nuisible, nous étudions actuellement une technique de pompage radial des atomes neutres froids avant l'étagé de chauffage. Une fois pompés, les atomes froids sont réinjectés en aval du col de la tuyère, où l'énergie cinétique désordonnée des ions a déjà été transformée en une énergie cinétique directionnelle. L'échange de charge facilite le détachement du plasma de la tuyère.

Bien que les antennes hélicoïdales puissent ioniser presque tous les gaz, ceux qui sont constitués d'éléments légers, tels l'hydrogène ou l'hélium, sont plus intéressants. En effet, le chauffage ionique par résonance cyclotron est facilité dans les gaz légers dont les fréquences cyclotron, pour des champs magnétiques modérés (de l'ordre de un tesla), sont compatibles avec les techniques radio existantes pour les hautes fréquences. L'hydrogène étant l'élément le plus abondant de l'Univers, les vaisseaux spatiaux trouveront du carburant presque partout. La production de champs magnétiques intenses est une difficulté que nous cherchons à surmonter. Nous étudions de nouveaux supraconducteurs à haute température qui contiennent des oxydes de bismuth, de strontium, de calcium et de cuivre. Nous prévoyons d'utiliser de l'hydrogène à très basse température pour les refroidir.

Aujourd'hui, l'essentiel des recherches que nous menons sur VASIMR est concentré sur le VX-10. Ce prototype ou l'un des modèles dérivés sera bientôt testé dans l'espace. Un essai est prévu pour 2004 lorsqu'un vaisseau spatial doté d'un moteur de dix kilowatts fonctionnant à l'énergie solaire partira étudier les ceintures de radiation de la Terre (ceintures de van Allen).

Un système VASIMR sera aussi employé pour neutraliser la traînée atmosphérique de la station spatiale internationale. Les résultats récents et les progrès rapides dans la miniaturisation du matériel radio augurent bien du succès de ces premiers tests dans l'espace.

La véritable mise à l'épreuve de VASIMR se fera toutefois au cours du voyage vers Mars. Les études en cours prévoient un système VASIMR de 12 mégawatts. Le vaisseau qui accomplira cette mission suivra pendant quelque 30 jours une trajectoire de libération en spirale avant de commencer un voyage interplanétaire de 85 jours (deux fois plus rapide qu'avec une fusée à propulsion chimique). Pendant cette traversée, la fusée accélérera pendant une grande partie du voyage, puis ralentira à l'approche de Mars. Un module habité se détachera du vaisseau pour aller se poser sur Mars à l'aide de fusées chimiques, tandis que le vaisseau interplanétaire crociera non loin de la planète rouge, pendant quatre mois, suivant une trajectoire «économe». Afin de garantir la sécurité de l'équipage, il sera possible d'abandonner rapidement la mission en utilisant le mode «forte poussée du VASIMR. Le champ magnétique et l'hydrogène feraient écran aux rayonnements cosmiques, protégeant l'équipage.

La fusée VASIMR pourrait n'être que le précurseur des fusées dont certains d'entre nous rêvent : les moteurs à fusion nucléaire. Leurs puissances iraient de 10 à 100 gigawatts. Bien sûr, nous sommes loin de maîtriser la fusion nucléaire, mais les progrès sont constants. Sans doute les générations futures utiliseront-elles cette énergie pour voyager rapidement vers les planètes lointaines.

Franklin CHANG DÍAZ, docteur en physique des plasmas de l'Institut de technologie du Massachusetts, a participé à cinq missions spatiales, notamment au lancement de la sonde *Galileo* vers Jupiter et au dernier accostage entre la navette et la station spatiale russe *Mir*.

Gabriel GIANNINI, *Electrical Propulsion in Space*, in *Scientific American*, vol. 204, n° 3, pp. 57-65, mars 1961.

Ernst STUHLINGER, *Ion Propulsion for Space Flight*, McGraw-Hill, 1964.

F.R. CHANG DÍAZ et al., *The Develop-*

ment of the VASIMR Engine, in *Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, papier 99-102, Turin, Italie, 13-17 septembre 1999. Texte disponible à l'adresse suivante : spaceflight.nasa.gov/mars/technology/propulsion/aspl

F.R. CHANG DÍAZ, J.P. SQUIRE, R.D. BENGTON, B.N. BREIZMAN, F.W. BAITY et M.D. CARTER, *The Physics and Engineering of the VASIMR Engine*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, papier 2000-3756, 17-19 juillet 2000.

Les premières sociétés d'Égypte

BARBARA BARICH • ENRICO BARICH

Les habitants d'un Sahara humide et verdoyant ont été les premiers agriculteurs. Quand la sécheresse les a chassés, ils ont migré vers le Nil, apportant leur savoir-faire à ce qui allait devenir la civilisation agricole égyptienne de la vallée du Nil.

Archivio Missione archeologica italiana a Fara

1. L'OASIS DE FARAFRA attirait autrefois les bergers nomades du Sahara en quête d'eau pour leurs troupeaux.